

# Методика измерения КСВН переходов с коаксиальной линии на печатные платы СВЧ-устройств

Владимир БИРЮКОВ  
Рафаэль САФИН  
October@neywa.ru

Предлагается методика измерения КСВН переходов с коаксиальной линии на печатные платы СВЧ-устройств (СВЧ-вводов), аналогичная методике измерений, изложенной в статье [1], но отличающаяся учетом потерь в полосковой линии печатной платы. Приведены формулы для оценки величины погрешности измерения КСВН.

## Введение

В настоящее время разработано и серийно выпускается множество типов переходов с коаксиальной линии на СВЧ-линии, которые выполнены на печатных платах (далее — переходы) и устанавливаются соосно или перпендикулярно поверхности печатной платы. Существует еще большее разнообразие видов печатных плат, где размещаются эти переходы. Платы различаются по типу диэлектрика, его толщине, толщине фольги, типу линии передачи СВЧ (полосковая, микрополосковая, компланарная, щелевая). Один и тот же переход может устанавливаться на разные типы плат. При этом, при неизменной коаксиальной части перехода, КСВН перехода зависит от типа линии передачи СВЧ, конфигурации проводников платы в местах соединения корпуса и центрального проводника перехода, от числа и размеров металлизированных отверстий, соединяющих, например, боковые проводники компланарной линии с экраном и т. д. Следовательно, если в сопроводительной или рекламной информации приводится величина КСВН, это означает лишь то, что величина КСВН гарантируется только при применении на плате, аналогичной тестовой плате, на которой устанавливался переход при измерениях КСВН.

Как уже отмечалось в [1], в иностранных источниках не приводятся особенности методики измерений переходов, а указаны только ссылки на стандарт MIL\_STD\_202. Метод скользящей нагрузки в ГОСТ 20465\_85 может быть в принципе применен для измерения КСВН переходов на микрополосковые, щелевые или компланарные линии передачи [2]. При современном уровне измерительной техники нет необходимости в применении адаптера и однородного отрезка (предназначенного для исключения КСВН адаптера из результатов измерений). Однако этот метод не может быть пригоден для переходов на полосковые линии передач, применяемые в многослойных печатных платах, в том числе и выполненных по технологии LTCC. Кроме того, КСВН скользящей нагрузки увеличивается с уменьшением частоты (из-за конечной длины нагрузки), что приводит к ограничению полосы частот достоверного измерения. Следует упомянуть, что для этого метода требуется наличие аттестованной скользящей нагрузки и отсутствие прогиба, а также соответствующее качество поверхности печатных плат. Измерение КСВН перехода выполняется и с помощью микрополосковых калибровочных стандартов [3] в качестве согласованной нагрузки. Однако в таком случае резко сокращается число вариантов типов печатных плат, с которыми можно проводить данную процедуру.

В [1] приведена методика измерения КСВН коаксиально-микрополосковых переходов с применением измерительных (далее — тестовых)

микрополосковых плат. Указанная методика решает поставленную задачу, но не учитывает потери в печатной плате, увеличивающиеся с повышением частоты и удлинением печатной платы. Увеличение длины печатной платы желательно для получения большего количества максимумов КСВН тестовой платы, а значит, и большего числа частот, на которых определяется КСВН. Сущность метода в [1] заключается в том, что два коаксиально-микрополосковых перехода, соединенные с микрополосковой платой, считаются одинаковыми. В связи с этим на частотах с максимальной величиной КСВН тестовой платы предполагается, что модуль коэффициента отражения от тестовой платы в 2 раза больше, чем модуль коэффициента отражения от одного коаксиально-микрополоскового перехода. При этом потери в тестовой плате не учитываются. Ниже приведены методика измерений КСВН переходов с учетом потерь в тестовой плате и формулы для оценки погрешности измерений КСВН переходов.

## Вывод расчетных формул

Для более детального анализа методики измерений рассмотрим схему передачи и отражений электромагнитной волны в тестовой плате [4], приведенную на рис. 1.

Здесь П1, П2 — испытываемые переходы; ПЛ — полосковая линия СВЧ печатной платы;  $T_n$  — коэффициент передачи электромагнитной волны линии СВЧ печатной платы (далее — коэффициент передачи);  $S_{11}$  — коэффициент отражения электромагнитной волны (далее — коэффициент отражения) от перехода П1 со стороны его входа;  $S_{11}^{(1)}$  — коэффициент отражения от перехода П2 со стороны

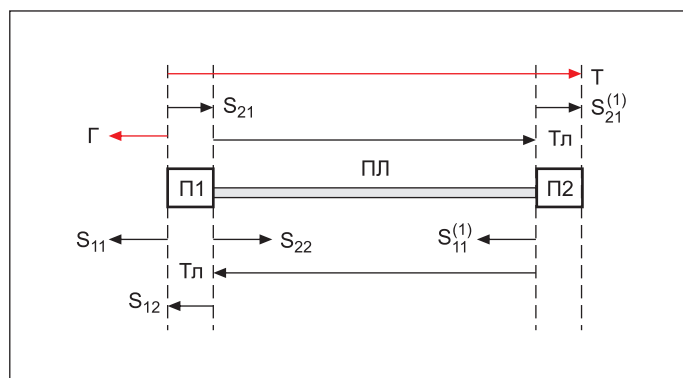


Рис. 1. Схема передачи и отражений электромагнитной волны в тестовой плате

линии СВЧ;  $S_{22}$  — коэффициент отражения от перехода П1 со стороны линии СВЧ;  $S_{21}$  — коэффициент передачи через переход П1 от входа до линии СВЧ;  $S_{12}$  — коэффициент передачи через переход П1 от линии СВЧ до входа перехода;  $S_{21}^{(1)}$  — коэффициент передачи через переход П2 от линии СВЧ до входа перехода;  $T$  — коэффициент передачи тестовой платы;  $\Gamma$  — коэффициент отражения от тестовой платы.

Для перехода П1 будем считать нагрузкой линию передачи с переходом П2, тогда коэффициент отражения от нагрузки  $\Gamma_n$  запишем в виде:

$$\Gamma_n = T_n \times T_n \times S_{11}^{(1)}. \quad (1)$$

С учетом этого коэффициенты отражения  $\Gamma$  и передачи  $T$  тестовой платы можем записать как [4]:

$$\Gamma = S_{11} + (S_{21} \times S_{12} \times \Gamma_n) / (1 - S_{22} \times \Gamma_n), \quad (2)$$

$$T = (S_{21} \times S_{21}^{(1)} \times T_n) / (1 - S_{22} \times \Gamma_n). \quad (3)$$

Знаменатели в формулах (2) и (3) учитывают многократные отражения между переходами П1 и П2. Так как  $|S_{22} \times \Gamma_n| \ll 1$ , отбрасывая члены второй и более степеней в разложении функции  $1/(1 - S_{22} \times \Gamma_n)$ , запишем:

$$1/(1 - S_{22} \times \Gamma_n) \approx 1 + S_{22} \times \Gamma_n. \quad (4)$$

Таким образом, формулы (2) и (3) можем переписать в виде:

$$\Gamma = S_{11} + S_{21} \times S_{12} \times \Gamma_n + \Delta\Gamma_s, \quad (5)$$

$$T = S_{21} \times S_{21}^{(1)} \times T_n + \Delta T_s, \quad (6)$$

где

$$\Delta\Gamma_s \approx S_{21} \times S_{12} \times S_{22} \times \Gamma_n^2, \quad (7)$$

$$\Delta T_s \approx S_{21} \times S_{21}^{(1)} \times T_n \times S_{22} \times \Gamma_n. \quad (8)$$

Оценка погрешности измерения КСВН переходов, обусловленная пренебрежением многократными отражениями, будет приведена далее.

Без учета многократных отражений между переходами П1 и П2 формулы (5) и (6) с учетом (1) перепишем в виде:

$$\Gamma = S_{11} + S_{21} \times S_{12} \times T_n \times T_n \times S_{11}^{(1)}, \quad (9)$$

$$T = S_{21} \times S_{21}^{(1)} \times T_n. \quad (10)$$

Переходы П1 и П2 считаем одинаковыми, а потери в переходах малыми, тогда для четырехполюсников без потерь [4]:

$$\begin{aligned} S_{21} &= S_{21}^{(1)} = S_{12}; \\ |S_{11}| &= |S_{22}| = |S_{11}^{(1)}|; \\ |S_{21}| &= |S_{12}| = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Поскольку потерями в переходах пренебрегаем, то очевидно:

$$|\Gamma| = |\Gamma_n|. \quad (12)$$

Выражая величину  $T_n$  из (10) и подставляя в (9), с учетом (11) получаем:

$$|\Gamma| = |S_{11}| \times |1 + |\Gamma|^2 \times e^{j\varphi}|, \quad (13)$$

$$\varphi = 2 \times \varphi_T - 2 \times \varphi_{21} + \varphi_{11}^{(1)} - \varphi_{11}, \quad (14)$$

где  $\varphi_T$  — фаза коэффициента прохождения  $T$  тестовой платы;  $\varphi_{21}$  — фаза коэффициента передачи  $S_{21}$  перехода П1;  $\varphi_{11}^{(1)}$  — фаза коэффициента отражения  $S_{11}^{(1)}$  перехода П2;  $\varphi_{11}$  — фаза коэффициента отражения  $S_{11}$  перехода П1.

Фаза  $\varphi$  зависит от постоянной распространения в линии СВЧ, ее длины, фаз пересчитанных выше коэффициентов и частоты.

Из (13) видно, что величина модуля коэффициента отражения тестовой платы  $|\Gamma|$  зависит от фазы  $\varphi$  и максимальна при фазах  $\varphi = 2 \times m \times \pi$ , где  $m = 0, 1, \dots$ . Обозначим условным номером  $i$  частоты, на которых величина модуля коэффициента отражения тестовой платы (КСВН) максимальна.

С учетом этого (13) перепишется в виде:

$$\Gamma_{i, \max} = |S_{11}|_i \times (1 + |\Gamma_i|^2), \quad (15)$$

где  $\Gamma_{i, \max}$  — максимальное значение модуля коэффициента отражения тестовой платы на частоте с номером  $i$ ;  $|S_{11}|_i$  — модуль коэффициента отражения перехода на частоте с номером  $i$ ;  $|\Gamma_i|$  — модуль коэффициента передачи тестовой платы на частоте с номером  $i$ .

Из (15) получим выражение для вычисления модуля коэффициента отражения перехода:

$$|S_{11}|_i = \Gamma_{i, \max} / (1 + |\Gamma_i|^2). \quad (16)$$

Связь между модулем коэффициента передачи тестовой линии  $|\Gamma|$  и величиной потерь в тестовой плате  $\alpha$ , дБ, определяется формулой:

$$|\Gamma_i| = 10^{-\alpha i / 20}. \quad (17)$$

Таким образом, окончательно получаем формулу для вычисления модуля коэффициента отражения перехода на частотах  $i$ , соответствующих максимальным значениям КСВН:

$$|S_{11}|_i = \Gamma_{i, \max} / (1 + 10^{\alpha i / 10}). \quad (18)$$

Величина КСВН перехода на частоте с номером  $i$  максимума КСВН тестовой линии вычисляется по известной формуле:

$$КСВН_i = (1 + |S_{11}|_i) / (1 - |S_{11}|_i). \quad (19)$$

**Примечание.** При отсутствии потерь в тестовой плате, то есть при  $\alpha = 0$ , получаем вариант методики измерений, приведенный в [1]. Из формул (18) и (19) видно, что пренебрежение потерями в тестовой (измерительной) линии приводит к занижению измеренной величины КСВН. Можно показать, что при КСВН коаксиально-микрополоскового перехода не более 1,35 (коэффициент отражения 0,15) разность между вычисленным КСВН по формуле (19) и вычисленным как корень квадратный из КСВН тестовой платы [1] не более 0,01.

### Методика измерений

Состав рабочего места для измерения КСВН переходов с коаксиальной линии на печатную плату приведен на рис. 2.

П1 и П2 — испытываемые переходы, установленные на тестовую плату; К1 и К2 — соединительные кабели, обеспечивающие соединение векторного анализатора цепей с испытываемыми переходами. Набор калибровочных мер обеспечивает калибровку векторного анализатора цепей в сечении стыковки испытываемых переходов П1 и П2 и кабелей К1 и К2. Векторный анализатор цепей любого типа обеспечивает работу в требуемом диапазоне частот.

При помощи набора калибровочных мер выполняется калибровка векторного анализатора цепей для измерения КСВН. Следует подключить кабели К1 и К2 к переходам П1 и П2, зафиксировать величину КСВН всех максимумов в требуемом диапазоне частот  $K_i$  и частоты  $f_i$ , соответствующие этим максимумам, где  $i$  — условный номер максимума КСВН. Примерный вид экрана векторного анализатора цепей приведен на рис. 3.

Используя набор калибровочных мер, можно произвести калибровку векторного анализатора цепей для измерения затуханий. Зафиксировать величину затуханий  $\alpha_i$  в дБ на ранее зафиксированных частотах  $f_i$ . Примерный вид экрана векторного анализатора цепей приведен на рис. 4. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены условные номера частот, соответствующих максимумам рис. 3.

Вычислим значения модулей коэффициентов отражений по формуле:

$$\Gamma_{i, \max} = (K_i - 1) / (K_i + 1). \quad (20)$$

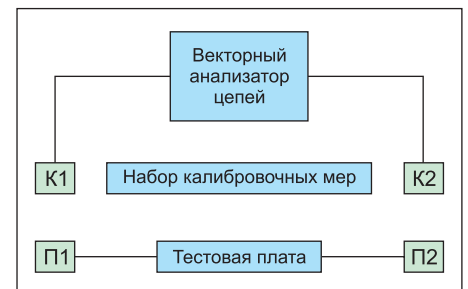


Рис. 2. Состав рабочего места для измерения КСВН переходов

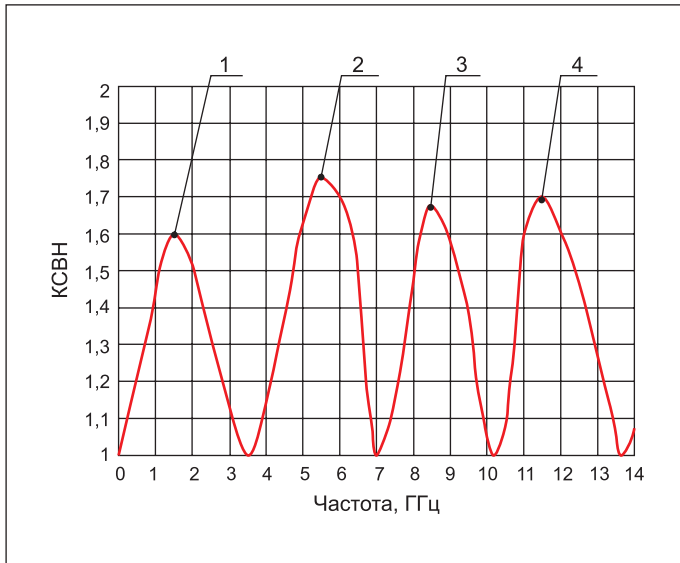


Рис. 3. Примерный вид экрана векторного анализатора цепей при измерении КСВН тестовой платы

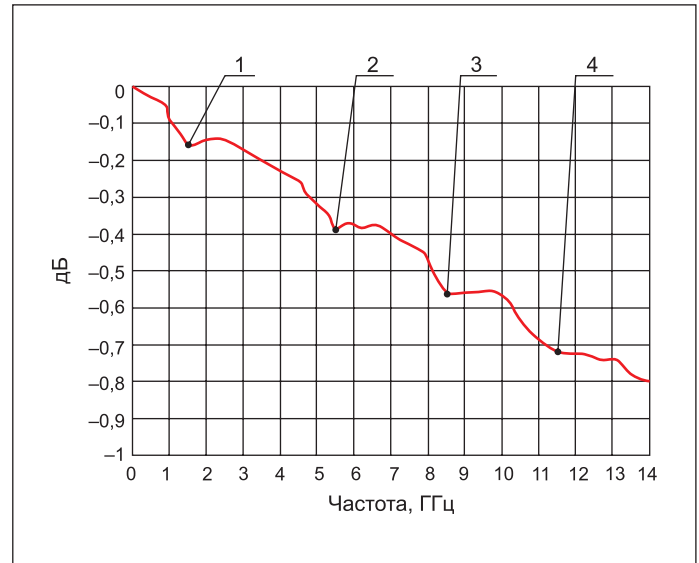


Рис. 4. Примерный вид экрана векторного анализатора цепей при измерении затуханий тестовой платы

Вычислим значения КСВН перехода по формулам (18) и (19).

**Примечание.** Вместо измерения КСВН  $K_i$  и вычисления коэффициента  $\Gamma_{i,\max}$  можно непосредственно измерять модули коэффициентов отражений  $\Gamma_{i,\max}$ . В этом случае вычисления по формуле (20) не требуется.

### Оценка погрешности измерений

Для оценки погрешности измерения КСВН перехода сначала определим погрешность измерения модуля коэффициента отражения перехода  $\Gamma_{i,\max}$ , обусловленную погрешностью измерения величины максимума КСВН тестовой линии —  $\Delta K_i$ . Для этого продифференцируем в (20) по  $K_i$  и заменим дифференциалы приращениями:

$$\Delta \Gamma_{i,k} = (2 \times \Delta K_i) / (1 + K_i^2), \quad (21)$$

где  $\Delta \Gamma_{i,k}$  — абсолютная погрешность определения величины  $\Gamma_{i,\max}$ , обусловленная погрешностью измерения КСВН;  $\Delta K_i$  — абсолютная погрешность измерения максимума КСВН с условным номером  $i$ .

**Примечание.** В том случае, если измеряется не КСВН —  $K_p$ , а модуль коэффициента отражения тестовой платы  $\Gamma_{i,\max}$ , то величину погрешности измерений  $\Delta \Gamma_{i,k}$  следует взять из описания к векторному анализатору цепей.

Примем во внимание сделанное выше пренебрежение многократными отражениями. Из (7) с учетом (1) и (11) получаем:

$$|\Delta \Gamma_s| \approx |\Gamma_s^2 \times S_{11}^3|. \quad (22)$$

Из (22), учитывая (12) и (16) и вводя индекс  $i$ , получим:

$$\Delta \Gamma_{i,s} \approx |\Gamma_i|^2 \times (\Gamma_{i,\max})^3 / (1 + |\Gamma_i|^2)^3. \quad (23)$$

Здесь  $\Delta \Gamma_{i,s}$  — абсолютная погрешность определения модуля коэффициента отражения тестовой платы  $\Gamma_{i,\max}$ , обусловленная пренебрежением многократными отражениями между переходами П1 и П2.

Суммарная абсолютная погрешность  $\Delta \Gamma_i$  определения величины  $\Gamma_{i,\max}$  может быть записана в виде:

$$\Delta \Gamma_i \leq \Delta \Gamma_p, k + \Delta \Gamma_{i,s}. \quad (24)$$

Для определения погрешностей измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|_i$  перехода, обусловленных погрешностью  $\Delta \Gamma_i$  определения модуля коэффициента отражения  $\Gamma_{i,\max}$  и погрешностью измерения коэффициента передачи тестовой линии  $\Delta \alpha_p$ , в формуле (18) возьмем частные производные по  $\Gamma_{i,\max}$  и  $\alpha_i$  и, заменив дифференциалы приращениями, с учетом (17) получим:

$$\Delta S_p, \Gamma = \Delta \Gamma_i / (1 + |\Gamma_i|^2), \quad (25)$$

$$\Delta S_{i,\alpha} = \frac{|\Gamma_i|^2 \times \Gamma_{i,\max} \times \ln(10) \times \alpha_i}{(1 + |\Gamma_i|^2)^2 \times 10}. \quad (26)$$

Здесь  $\Delta S_{i,\Gamma}$  — абсолютная погрешность определения модуля коэффициента отражения перехода  $|S_{11}|_i$ , обусловленная погрешностью определения  $\Delta \Gamma_i$  модуля коэффициента отражения тестовой платы  $\Gamma_{i,\max}$ ;  $\Delta S_{i,\alpha}$  — абсолютная погрешность определения модуля коэффициента отражения перехода  $|S_{11}|_i$ , обусловленная погрешностью измерения  $\Delta \alpha_i$  затухания тестовой платы  $\alpha_i$  (величины  $\Delta \alpha_i$  и  $\alpha_i$  в дБ).

Для оценки погрешности измерения модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|_i$  перехода  $\Delta S_{i,s}$ , обусловленной отклонением коэффициента передачи тестовой платы  $T$  за счет пренебрежения многократными отражениями, как в (8), продифференцируем (16)

по  $|\Gamma_i|$ , заменив дифференциалы приращениями и учитывая формулы (1), (8), (11), (12) и (16), получим:

$$\begin{aligned} \Delta S_{i,s} &= \frac{2 \times |\Gamma_i| \times \Delta \Gamma_s}{(1 + |\Gamma_i|^2)^2} \approx \\ &\approx \frac{2 \times |\Gamma_i|^4 \times |S_{11}|^2}{(1 + |\Gamma_i|^2)^2} \approx \frac{2 \times |\Gamma_i|^4 \times (\Gamma_{i,\max})}{(1 + |\Gamma_i|^2)^4}. \end{aligned} \quad (27)$$

Максимальную абсолютную погрешность измерения коэффициента перехода  $\Delta S_{i,\max}$  на частоте с номером  $i$ , обусловленную погрешностью измерения КСВН тестовой линии, погрешностью измерения затухания тестовой линии и пренебрежением многократными отражениями между переходами П1 и П2, вычислим по формуле:

$$\Delta S_{i,\max} \leq \Delta S_{i,\Gamma} + \Delta S_{i,\alpha} + \Delta S_{i,s}. \quad (28)$$

Величину модуля коэффициента отражения  $\Gamma_z$ , обусловленную отклонением волнового сопротивления тестовой линии от стандартного, как правило, 50 или 75 Ом, вычислим по формуле [4]:

$$\Gamma_z = |Z - Z_0| / (Z + Z_0) = |\Delta Z| / (Z + Z_0), \quad (29)$$

где  $Z_0$  — стандартное волновое сопротивление;  $Z$  — волновое сопротивление тестовой линии;  $\Delta Z = Z - Z_0$ .

КСВН перехода  $K_z$ , обусловленного отклонением волнового сопротивления тестовой линии от стандартного, вычислим по формуле:

$$K_z = (1 + \Gamma_z) / (1 - \Gamma_z). \quad (30)$$

Так как при  $Z = Z_0$ ,  $\Gamma_z = 0$  и  $K_z = 1$ , то

$$\begin{aligned} \Delta K_z &= (1 + \Gamma_z) / (1 - \Gamma_z) - 1; \\ \delta K_z &= ((2 \times \Gamma_z) / (1 - \Gamma_z)) \times 100\%, \end{aligned} \quad (31)$$

где  $\Delta K_z$  — абсолютная и  $\delta K_z$  — относительная (относительно  $K_z = 1$ ) погрешности измерения КСВН перехода.

Отметим, что стандартное волновое сопротивление в линиях передачи с дисперсией, — а микрополосковые, щелевые и компланарные линии обладают дисперсией (зависимостью волнового сопротивления от частоты), — равно величине 50 или 75 Ом только на низких частотах.

Для определения величины погрешности измерения КСВН перехода абсолютной  $\Delta K_{СВН_i}$  ( $\delta K_{СВН_i}$  — относительной), обусловленной погрешностью измерения КСВН тестовой линии, погрешностью измерения затухания тестовой линии и пренебрежением многократными отражениями между переходами П1 и П2, продифференцировав в формуле (19) по  $|S_{11}|_i$ , заменив дифференциалы приращениями и заменив  $\Delta |S_{11}|_i$  на  $\Delta S_{i,max}$ , получим:

$$\Delta K_{СВН_i} \leq (2 \times \Delta S_{i,max}) / (1 - |S_{11}|_i)^2$$

или

$$\delta K_{СВН_i} \leq (K_{СВН_i} + 1)^2 / (2 \times K_{СВН_i}) \times \Delta S_{i,max} \times 100\% \quad (32)$$

При выводе последней формулы использовалась связь между  $|S_{11}|_i$  и  $K_{СВН_i}$  формулы (19).

Проведем численную оценку погрешности измерения КСВН перехода. Предположим, что исходные данные измерений соответствуют данным таблицы 1.

$K_i$	$\delta K_i$	$\alpha_i$	$\Delta \alpha_i$
1,6	1%	1,5 дБ	10%

По формулам (20), (18) и (19) получаем:

$$\Gamma_{i,max} = 0,231; |S_{11}|_i = 0,135; K_{СВН_i} = 1,31.$$

Вычисленные по формулам (21), (23–28) погрешности измерений коэффициента отражения перехода приведены в таблице 2.

Таблица 2. Погрешности измерений коэффициента отражения перехода

$\Delta \Gamma_{i,k}$	$\Delta \Gamma_{i,s}$	$\Delta \Gamma_i$	$\Delta S_{i,\Gamma}$	$\Delta S_{i,\alpha}$	$\Delta S_{i,s}$	$\Delta S_{i,max}$
0,005	0,0018	0,0065	0,0038	0,0019	0,0063	0,012

С учетом этих данных из (32) получаем:

$$\delta K_{СВН_i} \leq (1,31 + 1)^2 / (2 \times 1,31) \times 12 \times 10^{-3} \times 100\% \leq 2,5\%$$

При отклонении волнового сопротивления тестовой линии от стандартного, например 50 Ом, на 4,5% из (31) получаем:

$$\Gamma_z = 2,25 / (100 \pm 2,25) \leq 0,023, \delta K_z \leq ((2 \times 0,023) / (1 - 0,023)) \times 100\% = 4,7\%$$

Как правило, требования по КСВН на соединители и переходы задаются в форме: не более, чем в диапазоне частот. Поэтому нет необходимости оценивать погрешность измерения на всех частотах, на которых проведены измерения, — достаточно только частоты, на которой КСВН имеет наименьшую разницу между требованием и результатом измерения.

Следует отметить, что принятие равенства переходов П1 и П2 вполне допустимо, поскольку обычно задача измерения КСВН конкретного перехода не ставится, а решается вопрос о параметрах данного типа переходов с конкретным типом линии передачи

СВЧ. В этом случае методика эквивалентна ситуации, когда измеряются КСВН двух конкретных переходов П1 и П2 и вычисляется среднее значение КСВН. Для решения задачи измерения КСВН конкретного перехода более пригодной представляется, например, методика измерений со скользящей нагрузкой.

### Заключение

1. Предложенная методика измерения КСВН перехода учитывает потери в тестовой линии и может использоваться не только разработчиками и изготовителями переходов при разработке и производстве переходов (СВЧ-вводов) для контроля их качества, но и разработчиками печатных плат с СВЧ-устройствами для проверки КСВН переходов на конкретный тип печатной платы.
2. Погрешность измерения КСВН перехода за счет отклонения волнового сопротивления тестовой линии от стандартного не зависит от метода измерения КСВН перехода, поскольку переход при измерениях всегда должен соединяться с линией передачи СВЧ. ■

### Литература

1. Алексеенков В., Верещагин А., Джурицкий К. Экспериментальное исследование частотной зависимости КСВН коаксиально микрополосковых переходов // Компоненты и технологии. 2008. № 4.
2. Андросов А., Джурицкий К. Герметичные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Электрические параметры и методика их измерения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 5.
3. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
4. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973.